

基于全三维模型的复合材料构件成型工艺设计系统研究*

孟月梅^{1,2}, 冯妙婷^{1,2}, 顾信安^{1,2}

(1. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024;

2. 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 分析了复合材料构件数字化设计制造技术的发展状况, 阐述了基于全三维模型的工艺设计系统的研究现状。针对复材构件成型工艺设计特点, 研究了基于全三维模型的复材构件成型工艺设计系统构建技术, 阐述了系统的主要功能和实现方法。在 CATIA 环境下开发了基于全三维模型的复材构件成型工艺设计系统, 并通过多个构件的工艺设计对系统功能进行了验证。

关键词: 全三维模型; 复材构件; 工艺设计; 复材工艺模型; 工艺知识

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.064



孟月梅

研究员, 主要从事计算机辅助设计制造、工艺设计、MBD 技术的研究与软件开发工作, 并对复合材料构件自动铺放编程软件、增材制造数据处理软件等进行研究与开发, 曾多次获得省部级奖项。

复合材料在航空、航天、汽车等领域的广泛应用, 促进了复合材料成型工艺技术的快速发展, 并相继出现了热压罐、树脂转移(RTM)、树脂膜渗透(RFI)、真空辅助(VARI)等多种工艺成型方法。随着复合材料全三维设计技术的推广与应用, 为满足数字化制造需求, 缩短工艺准备周期, 提高复材构件制造效率与质量, 急需提供基于全三维模型的快速工艺设计方法。

国外在复合材料制造工艺技术、数字化工具及工艺装备方面形成了比较完整的技术体系, 开发了专门的复合材料构件设计、制造及分析工具, 如 CATIA 软件, 为复合材料设计制造提供了一整套专业的解决方案, 包括复合材料构件设计、DMU/CAE 分析、可制造性分析等^[1]。该软件不仅能够建立三维复材构件铺层设计模型, 还针对构件制造提供了铺层切片、铺层展开、铺层制造数据生成等

功能。总体来讲, 国外在基于全三维模型的复合材料构件设计制造技术方面取得了较好的应用, 所开发软件很好地支持了构件的数字化设计制造过程, 实现了基于三维模型的工艺设计、过程仿真、可视化显示等技术。

国内在复合材料构件设计制造领域, 运用 CAD/CAM、MBD 技术, 建立了基于 MBD 的三维复材构件模型、三维工装模型。在复材构件计算机辅助工艺设计技术方面, 国内学者也做了大量的研究工作。梅立等^[2]针对复材工艺参数种类多、数据量大以及知识重用等问题, 研究并开发了基于知识库的复材构件计算机辅助工艺设计系统; 张钧琰等^[3]研究了复合材料构件工艺设计知识库构建技术, 并开发了基于 B/S 架构的复材构件工艺设计知识库系统。在基于全三维模型的工艺设计技术方面, 主要针对机加、钣金、装配等制造工艺, 研究与开发了基于全三维模型的工

* 基金项目: 智能制造装备发展专项。

艺设计系统^[4-7],而对于基于全三维模型的复材构件成型工艺设计系统方面的研究较少。

本文运用CAD/CAM、MBD、知识工程等技术,针对基于全三维模型的复材成型工艺设计系统,研究了基于全三维模型的复材成型工艺信息模型构建技术,阐述了复材工艺设计系统的主要功能和实现方法,并开发了基于全三维模型的复材构件成型工艺设计系统。该系统的研究为复材构件实现数字化制造奠定了技术基础。

复材构件成型工艺设计的特殊性

复材构件在设计过程中,已经针对工艺需求与制造部门进行了反复的沟通和协商。因此,当设计部门将复材构件设计模型提供给制造部门时,已确定了成型工艺方案,并给出了制造要求。制造部门根据设计提供的工艺方案,进行成型工艺设计。

在复材成型构件工艺规划时,大多数利用已积累经验、知识进行工艺设计,有时会针对个别工序的工艺方法、工艺参数进行验证。同时,一旦成型工艺方案确定,其制造过程的变化范围非常有限。因此,针对各类成型工艺方法,总结典型工序、典型工艺模板等工艺知识,使之用于工艺规

划过程中,不仅能重用积累的工艺知识、经验,还可以缩短工艺设计时间,保证工艺设计质量。同时,复材成型涉及的工艺参数种类、数据量都比较大,工艺参数设置的工作量也较大。因此,建立复材工艺设计知识库、工艺参数库是实现快速工艺设计的关键与基础。

复材构件所需工装/模具的材料、结构形式、表面质量、热膨胀偏差是影响制件质量的重要因素^[8]。在工艺设计中,根据构件材料、结构形式、厚度等情况,明确工装设计、制造技术要求是非常必要的。工装技术要求信息的创建与管理是复材成型工艺设计系统必需提供的基本功能。

复材构件工艺设计时,还需要考虑各工序之间的约束关系。如预浸料存放时间对加压带会产生一定影响,铺叠与固化前的准备时间、预吸胶过程、预吸胶和固化时的升温速率等对加压带都有一定影响^[9]。另外,为缩短制造周期,有些工序还可以同时进行。这些约束条件均需在工艺设计时明确设置,使之能够准确指导实际生产。

基于全三维模型的复材成型工艺设计系统构建技术

基于全三维模型的复材成型工

艺设计系统,以全三维设计模型、工装模型为基础,在三维环境下建立复材成型工艺信息模型,实现工艺流程、工艺信息的创建与管理,建立工序/工步与其相关模型、制造数据的关联关系。为实现基于全三维模型的复材成型工艺设计系统,构建符合MBD技术要求的工艺信息模型是其基础与关键。

1 基于全三维模型的复材成型工艺信息模型构成

基于全三维模型的复材构件成型工艺信息模型所包含信息可划分为两大类,即几何信息与非几何信息。在该模型中,将构件、工装的全三维设计模型所包含信息也按几何、非几何信息进行了划分。复材工艺信息模型构成如图1所示。

对于不同成型方法,其工艺信息模型包含的内容有所不同。下面仅以复材层合板构件的热压罐成型工艺为例,说明工艺信息模型中几何信息与非几何信息包含的具体内容。

1.1 复材工艺信息模型的几何信息

复材构件成型工艺信息模型中的几何信息主要包含如下信息:

- (1) 复材构件几何模型,包括铺层轮廓、铺层所在面、构件实体等几何;
- (2) 工装(模具)几何模型;
- (3) 工序几何模型^[10]。包括:

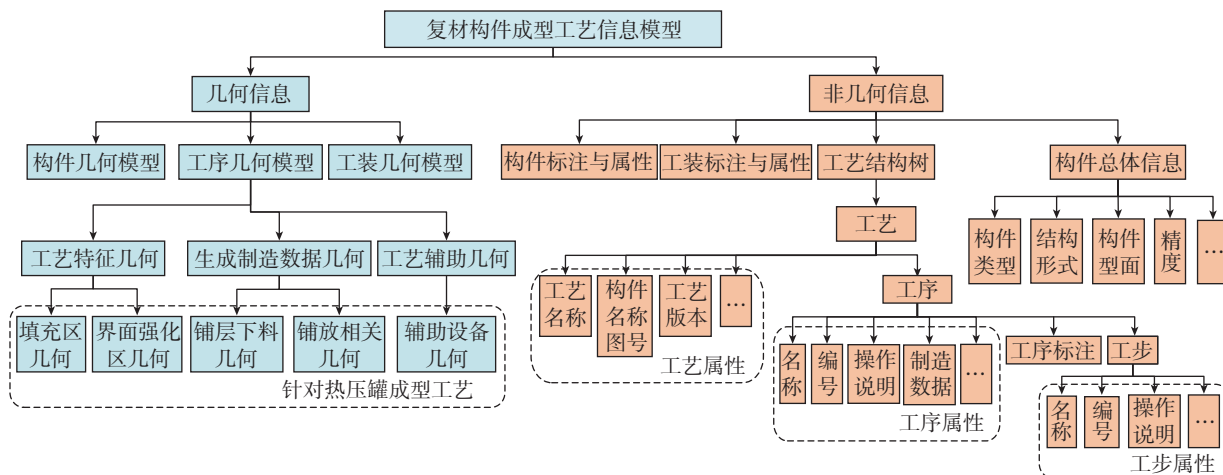


图1 复合材料构件成型工艺信息模型

Fig.1 Forming process information model for composites component

工艺特征几何。工艺特征对制造过程、工艺参数会产生直接影响。工艺特征包括三角填充区、界面强化区、共固化筋条等类型。工艺特征用于基于知识的快速工艺设计,为工艺流程、工艺参数决策提供依据。

铺层下料几何。用于生成半自动铺放方式的切片制造数据,根据预浸料宽度对展开铺层进行分割后,所生成的切片轮廓几何。

生成铺放数据的几何。铺放方式不同,所需制造数据也不同。半自动铺放方式的激光投影数据生成几何为铺层边界轮廓;自动铺放方式为铺放轨迹、铺放料带边界几何等。

工艺辅助几何。制造过程中需添加的辅助几何,如固化工序中的辅助设备(包括热电偶、真空嘴、随炉件)所在位置点及相关几何。在进行工艺设计时,需在工装(模具)表面创建辅助设备几何。

1.2 复材工艺信息模型的非几何信息

复材构件工艺信息模型中的非几何信息如下:

(1) 构件设计模型的标注与属性。

(2) 工装设计模型的标注与属性。

(3) 工艺结构树。由工艺、工序、工步按一定顺序与结构形式组成。工艺包括工艺属性、一系列的工序;工序包括工序属性、工序标注^[10]、一系列的工步。工序还可以与相关模型、参考几何、制造数据等建立关联关系;工步包含属性信息与关联关系。

(4) 构件总体信息包括构件类型、结构形式、型面、制造精度等信息,这些信息直接关系到工艺流程及工艺参数的确定,主要用于基于知识的快速工艺设计。

(5) 在热压罐成型工艺中,对成型过程中的辅助设备(如热电偶、真空嘴、随炉件等)需进行标注,且将

标注与其辅助设备几何相关联,给出辅助设备名称、类型等信息。在构件制造过程中这些辅助设备将按照工艺模型给定的位置进行布置。

复材工艺设计系统整体结构及数据流程

为实现基于全三维模型的复材构件成型工艺设计,需要在三维环境下构建工艺模型,实现工艺流程、工艺/工序/工步信息、工艺标注等的创建与管理。系统整体结构如图2所示,开发与运行环境主要包括数据库管理系统、复材工艺设计知识库、复材成型工艺设计系统开发平台、PDM系统等。复材工艺设计系统开发平台确保开发过程中能够读取全三维模型相关几何、标注、属性等信息,并能够构建复材工艺模型。复材工艺设计系统与PDM系统集成,由PDM系统负责工艺数据的管理与签审流程。

复合材料构件成型工艺设计系统主要功能包括工艺基础信息构建、工艺模型构建、工艺标注创建管理、建立复材工艺设计知识库等,并提供知识库维护工具。系统需实现的主

要功能如下:

(1) 复材工艺基础信息创建与管理,包括构件总体信息、工艺特征、工装技术要求、工艺辅助几何创建与管理功能。

(2) 复材构件工艺模型建立,主要提供工艺结构树的创建与管理功能。构建工艺结构树的总体框架,实现工艺总体结构的创建与管理;利用工艺设计知识库,并结合工艺基础信息,快速、准确地确定典型工序模板、典型工艺模板;建立工序/工步与设计模型、工装模型、参考几何、制造数据、工序图、工序模型等的关联关系,也可以删除关联关系。

(3) 工艺标注的创建与管理,能够生成工序所需的公差标注以及注释信息。

(4) 建立复合材料工艺设计知识库。包括典型工艺模板库、典型工序库、工艺参数库、工艺规则库、制造资源库等,提供工艺设计知识库维护工具。

与PDM系统集成的、基于全三维模型的复材构件成型工艺设计系统数据流程如图3所示。主要包括工艺任务管理、工艺设计工具、工艺

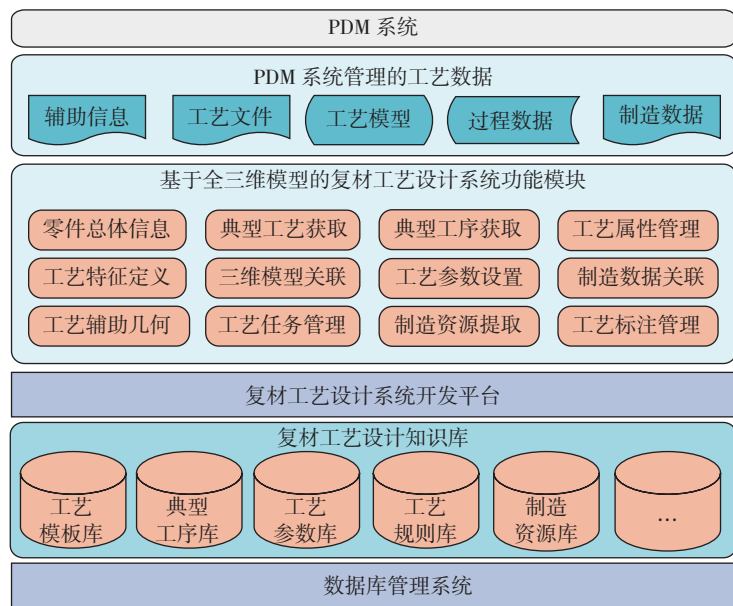


图2 复材构件成型工艺设计系统整体结构

Fig.2 Construction of forming process planning system for composites component

数据上传、数据库构建与维护。其中,工艺任务管理与工艺数据上传均通过与PDM系统集成接口实现。工艺设计工具主要实现复材构件工艺模型的构建,在工艺详细设计中,可提供交互式工艺设计、基于知识的快速工艺设计两种方式,最终生成复材构件成型工艺模型。建立复材工艺设计知识库、基础数据库、制造资源库以及工艺标准规范库,并提供数据库维护工具,实现各类数据的创建与管理。

复材成型工艺设计系统主要功能及实现方法

复材成型工艺设计系统主要包括工艺基础信息构建、工艺结构树创建与管理、工艺设计知识库的建立与维护等功能模块,其具体构成如图4所示。

1 工艺基础信息构建

工艺基础信息构建主要包括复材构件总体信息、工艺特征、工装技术要求等信息的创建与管理。构件总体信息、工艺特征为基于知识工艺设计的基础信息,是工艺流程决策的前提条件。工装技术要求是工装设计的依据,当复合材料构件工艺方案确定后,即可制定工装技术要求,并将相关内容提供给工装设计部门。构件总体信息与工装技术要求功能中需实现相关属性的添加、修改、删除等操作。

工艺特征包含了名称、类型、属性、几何等信息,其几何用于描述该工艺特征的形状、位置。在创建工艺特征时,不仅要实现对特征属性的创建与管理功能,还能够建立与多个几何的关联关系。

另外,根据成型工艺需求,需提供专用的工艺辅助几何生成功能。如针对热压罐成型工艺的辅助设备布置功能,实现在工装表面指定位置上添加辅助设备几何,并添加辅助设备注释信息。

2 工艺结构树创建与管理

工艺结构树是工艺模型的核心。工艺结构树主要由工艺、工序、工步构成,通过树状结构表达工艺、工序、工步的关系。系统需提供工艺/工序/工步的创建、编辑、删除等功能,以实现对工艺结构树的管理。工艺/工序/工步包含属性如图5所示。

由于复材构件结构形式及成型方法的特殊性,一个构件可能需要编制多个工艺才能完成构件的制造。因此,工艺结构树中可包含多个工艺。在构建工艺结构树总体结构时,可一次创建多个工艺节点,并能够设置每个工艺的属性。同时,提供总体结构及相关属性的修改、删除、浏览等管理功能。

工序、工步的创建可利用复材工艺设计知识库,结合工艺基础信息、工艺规则等信息快速获取典型工艺模板,并将工艺模板中的工序、工步信息添加到工艺结构树中,实现工艺结构树的快速创建;也可通过交互方式定义工序、工步信息。对于工序、工步涉及的制造资源,通过制造资源(包括材料、设备、工装、工具等)库获取,这样不仅能保证数据的准确性,而且也方便工艺的编制。系统需要提供制造资源库的创建与数据更新功能。同时,建立工序/工步与设计模型、工装模型、参考几何、制造数据等的关联关系,也可与图片、视频等文件进行关联。可提供工序、工步制造资源的统计信息。工序与工步创

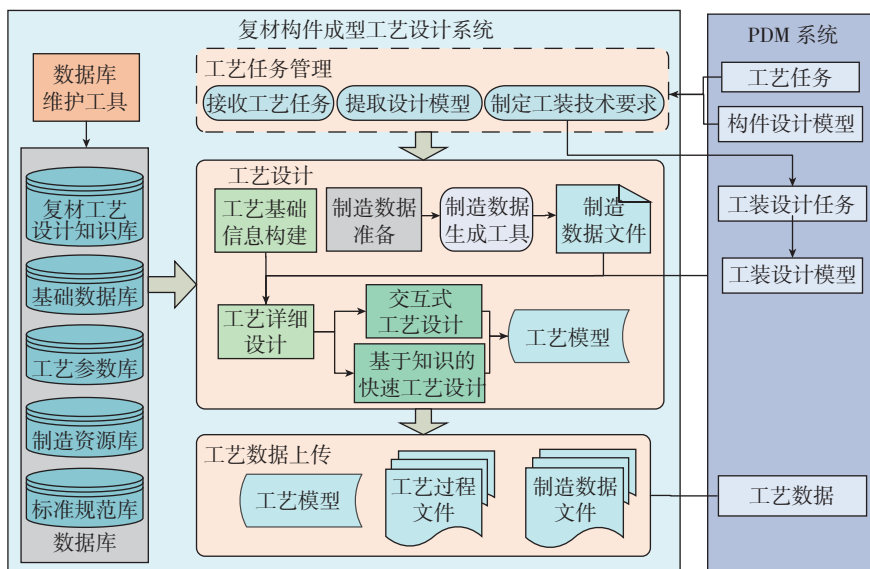


图3 复材构件成型工艺设计系统数据流程

Fig.3 Data flow of forming process planning system for composites component

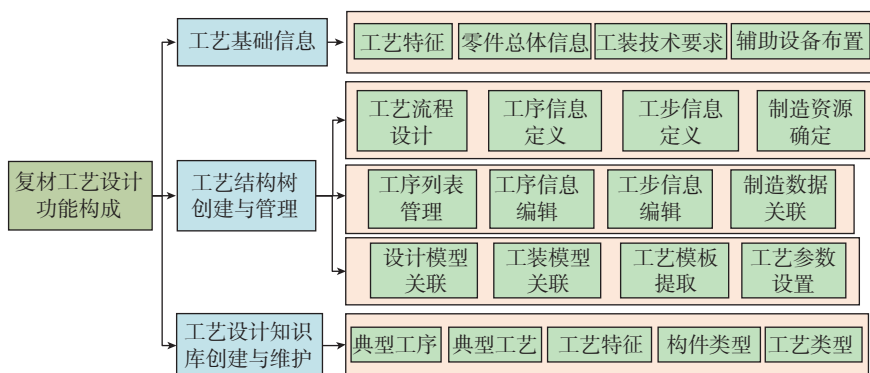


图4 复合材料工艺设计系统主要功能

Fig.4 Main functions of forming process planning system for composites component

建、管理需实现的功能如图 6 所示。

另外,复材成型工艺中有些工序涉及的工艺参数种类多、数据量大,工艺设计系统可针对这些工艺参数提供设置与管理功能,也可利用工艺参数库进行设置。如热压罐成型工艺中,铺叠工序涉及的工艺参数包括纤维最大偏差角度、切片间隙、电熨斗最高温度及加热时间、预压实真空度、预压实最短时间等,余胶量是预吸胶工序中吸胶系统必须给出的参数,且通常根据经验计算公式进行余胶量的计算。系统可提供铺叠工艺参数设置、余胶量计算等的创建与管理功能。

3 复材工艺设计知识库的建立与维护

建立复材构件成型工艺设计知识库的主要目的是提高工艺设计效率与质量,减少工艺设计人员的重复性工作,高效、准确地实现工艺结构树的构建。通过分析现有复合材料成型工艺流程及所包含的工艺信息,确定影响制造过程、操作方法、工艺参数等的关键因素,建立工艺基础数据库。归纳、提炼典型工序、典型工艺模板、工艺规则等,实现工艺知识的积累与重用。

复材工艺设计知识库主要包括典型工序、典型工艺模板、工艺规则;工艺基础数据库包括构件类型、结构形式、工艺类型、工艺特征等;制造资源库包括主要材料、辅助材料、

设备、工装、刀具、标准件、工具等;工艺标准与规范库包括工艺设计中所引用的标准、规范文件。通过对以上信息的提炼与归纳,确定各类信息的描述内容,并开发数据库维护工具,建立与维护复材工艺设计知识库。

在复材成型工艺中,不同工序的

工艺参数包含的数据种类差别非常大,在提炼工艺参数时,根据成型工艺、工序类型确定工艺参数类型,进一步明确其适用范围。制造资源主要根据制造过程关注的信息,确定各类型的描述信息。

为方便工艺知识的扩展,将工艺类型定义为树状结构形式。以热压

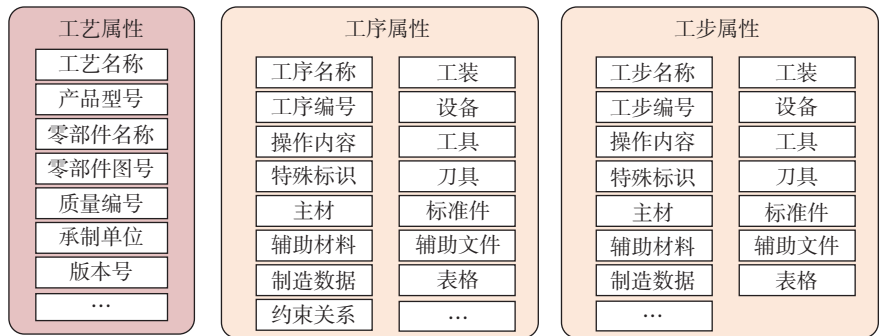


图5 工艺/工序/工步包含属性

Fig.5 Attributes of process/operation/step

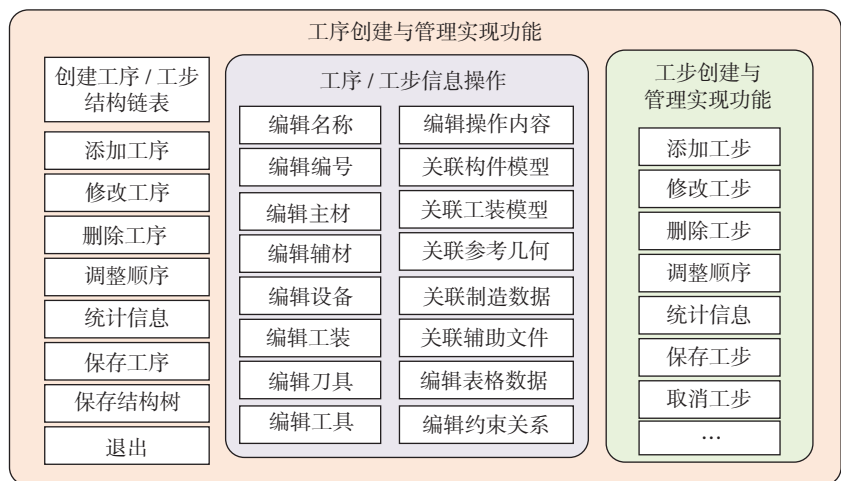


图6 工序/工步创建与管理功能

Fig.6 Creating and management functions for operation/step

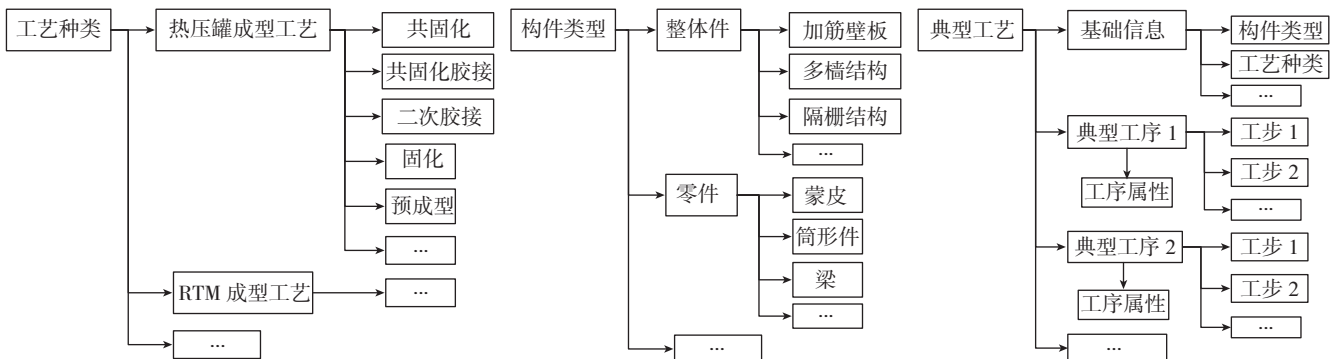


图7 基础数据与工艺知识信息

Fig.7 Information of foundation data and process knowledge

典型工艺模板	典型工序模板	工艺类型	构件类型	工艺特征	结构形式
工艺模板名称 工艺类型 工艺子类型 构件类型 构件子类型 材料类型 结构形式 应用条件 包含工艺模板 工序列表	工序名称 工序内容 操作内容 主材 / 辅材 工具 / 设备 工装 / 工步列表 工艺类型 工艺子类型 构件类型 构件子类型 应用条件	工艺名称 工艺类型 结构形式 工艺父类型 工艺子类型 说明 备注	构件名称 构件类型 构件父类型 构件子类型 结构形式 工艺类型 工艺子类型 说明 备注	特征名称 特征类型 制造说明 属性 几何 构件类型 构件子类型 工艺类型 工艺子类型	类型 名称 工艺类型 工艺子类型 构件类型 构件子类型 说明 属性

图8 基础数据与工艺知识属性

Fig.8 Attributes of foundation data and process knowledge

罐成型工艺为例,其子类型包括整体件、零件成型工艺。整体件成型工艺又可划分为3种(即共固化、共固化胶接、二次胶接),可根据现有构件类型、结构形式等归纳其典型工艺模板。图7列出了工艺种类、构件类型、典型工艺的组成信息。图8中列出了部分基础信息与工艺知识的属性。

复材工艺设计知识库维护工具可提供各类数据的创建、修改、删除、浏览等功能。同时,为保证数据库数据的安全,可提供用户管理功能,实现对系统用户、数据操作权限的控制。

复材构件成型工艺设计系统的开发

利用基于全三维模型的复材成型工艺设计系统构建技术与实现方法,运用 CATIA 二次开发工具 CAA,开发了复材构件成型工艺设计系统,实现了在三维环境下的复材成型工艺设计。在 CATIA 的工艺规划 DPM 模块中增加了复材成型工艺设计工具,开发了工艺结构树总体信息、工艺规程、检验规程等信息的创建与管理功能,并提供了自动输出工艺文件、结构化工艺 xml 文件生成、更新制造基础数据等功能。系统开发的复材成型工艺设计子系统主要实现功能如图9所示。

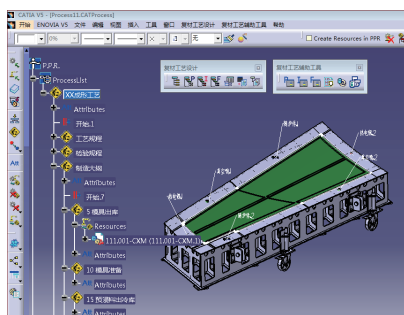


图9 复材成型工艺设计系统主要功能

Fig.9 Main functions of forming process planning system for composites

根据应用单位工艺文件类型,对工艺模型的工艺结构树作了适当调整,在工艺节点下增加了工艺规程、检验过程、制造大纲等节点,在这些节点下包含了工艺流程信息(即工序、工步信息),如图10所示。系统提供的工艺信息创建/编辑功能实现了对工艺总体结构的规划,其功能实现对话框如图11所示。

工艺规程创建与管理功能对话框如图12所示。为保持工艺规程、检验规程、制造大纲所包含工艺流程的一致性,当工艺规程创建完成后,在创建检验规程或制造大纲时,系统将自动读取工艺规程中的工序/工步相关信息,并将可用的信息添加到当前对话框的工艺列表中。用户可根据具体情况进行相关信息的修改或添加,最终将全部工序/工步信息存放到工艺模型的结构树上。

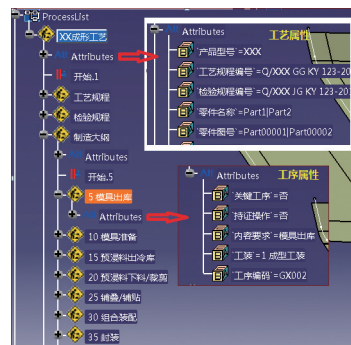


图10 工艺结构树包含信息

Fig.10 Informations of process tree



图11 工艺信息管理功能对话框

Fig.11 Dialog box of process information management function

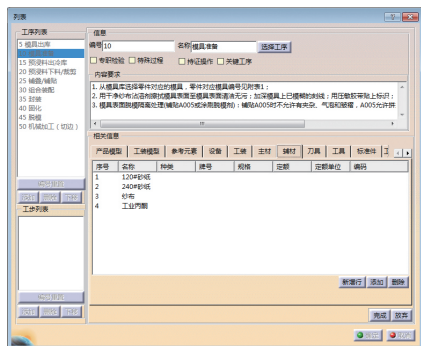


图12 工艺规程创建与管理功能对话框

Fig.12 Dialog box of technological procedure design management function

建立了复材工艺设计知识库,总结、提炼了热压罐成型工艺的典型工序与典型工艺模板。目前,系统提供了通过用户选择读取典型工序、典型工艺模板的功能。

另外,根据应用单位工艺文件管理方式,系统还提供了基于工艺模型的工艺文件自动输出功能,能够按照工艺文件规定格式自动输出相应的 word 文档(如工艺规程、检验规程、制造大纲等)。通过与 EPR 系统集成,建立了工艺设计所需的制造资源库。同时,为车间制造执行系统(MES)

提供了结构化工艺数据,用于指导现场实际生产。

目前,该系统正在某复材生产车间试用。利用该系统进行了多个构件的工艺设计,并建立了工艺模型。在此基础上,输出了满足生产需求的工艺文件,并为MES系统提供了结构化工艺数据。

结论

在CATIA环境下开发的基于全三维模型的复材成型工艺设计系统,实现了基于MBD的工艺模型构建,所提供工艺模型与工艺文件能够满足生产车间实际需求。另外,利用复材成型工艺设计知识库的典型工序、典型工艺模板进行工艺设计,可明显缩短工艺设计时间,提高了工艺设计效率与质量。后续将进一步扩充、完善复材成型工艺知识,使工艺知识库内容更加丰富、适用,以达到快速、准确进行工艺设计的目的。

参考文献

- [1] 浦一飞,李金超. CATIA V5 复合材料设计[J]. 航空制造技术, 2009(15): 81-82.
- PU Yifei, LI Jinchao. CATIA V5 composite design[J]. Aeronautical Manufacturing

Technology, 2009(15): 81-82.

- [2] 梅立,梅中义,范玉青. 复合材料构件计算机辅助成型工艺设计的研究[J]. 机械工程师, 2009(1): 118-121.

MEI Li, MEI Zhongyi, FAN Yuqing. Research on computer aided forming process design of composed material structure[J]. Mechanical Engineer, 2009(1):118-121.

- [3] 张钧琰, 安鲁陵, 李薇, 等. 复合材料构件工艺设计知识库系统开发[J]. 航空制造技术, 2015(18): 60-63.

Zhang Junyan, AN Luling, LI Wei, et al. Research and development of knowledge base system for process design of composite-structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(18): 60-63.

- [4] 贾晓亮, 田锡天, 耿俊浩, 等. 航空复杂产品基于三维产品模型的集成化CAPP系统研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(2): 82-85.

JIA Xiaoliang, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. Integrated CAPP system based on 3D product model for aeronautical product manufacturing[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(2): 82-85.

- [5] 郑雷. 基于MBD三维工艺设计系统的开发与应用[J]. 航空制造技术, 2014(5): 52-57.

ZHENG Lei. Development and application of 3D process design system based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(5): 52-57.

- [6] 冯潼能, 王铮阳, 孟静晖. MBD技术在数字化协同制造中的应用与展望[J]. 南京

航空航天大学学报, 2012, 44(B04): 132-137.

FENG Tongneng, WANG Zhengyang, MENG Jinghui. Application and development of MBD in digital collaborate manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(B04): 132-137.

- [7] 乔立红, 张金. 三维数字化工艺设计中的关键问题及其研究[J]. 航天制造技术, 2012(1): 33-36.

QIAO Lihong, ZHANG Jin. Some key issues in three-dimensional digital process planning and their research[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(1): 33-36.

- [8] 王菲, 杨博, 陈永清, 等. 大尺寸大厚度复合材料梁外形精确控制技术[J]. 航空制造技术, 2016(15): 87-91.

WANG Fei, YANG Bo, CHEN Yongqing, et al. Precise shape control technology of large scale and heavy section composites spar[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(15): 87-91.

- [9] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

ZHAO Qusen. Handbook of advanced composites[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

- [10] 田富君, 田锡天, 耿俊浩, 等. 基于模型定义的工艺信息建模及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 913-919.

TIAN Fujun, TIAN Xitian, GENG Juhao, et al. Model-based definition process information modeling and application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(5): 913-919.

Research on Forming Process Planning System for Composites Component Based on 3D Model

MENG Yuemei^{1,2}, FENG Miaoting^{1,2}, GU Xin'an^{1,2}

(1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technologies, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The development of digital design and manufacturing for composites component is analyzed. The research status of process planning system based on 3D model is described. According to characteristics of forming process planning for composites component, construction technology of process planning system for composites component based on 3D model is discussed. The functions and the implement methods of the system are introduced. The forming process planning system for composites component based on 3D model is developed, and the functions of the system are verified by planning composites components process.

Keywords: 3D model; Composites component; Process planning; Composites process model; Process knowledge

(责编 海山)